

УДК 539.214 + 621.7

*А. И. ПОКРОВСКИЙ***РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПЛАСТИЧЕСКОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ СРЕД
(ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ВЫДАВЛИВАНИЕ, ГИДРОУДАРНАЯ ШТАМПОВКА)***Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: arturu@tut.by*

Описаны технологии пластического формообразования металлов с использованием жидких и псевдожидких сред применительно к труднодеформируемым, малопластичным и труднообрабатываемым материалам, разработанные в Физико-техническом институте НАН Беларуси. Рассмотрены два технологических направления: 1) горячее гидродинамическое выдавливание изделий из чугуна с применением в качестве квазижидкой среды электродного графита, 2) холодная импульсная гидроударная штамповка листовых материалов с использованием жидких (станочная эмульсия) и псевдожидких (полиуретан) сред. Показаны преимущества каждого из направлений и представлены результаты наиболее значимых достижений института в данных областях за последние годы.

Ключевые слова: гидродинамическое выдавливание, чугун, гидроударная штамповка, ниобий.

*A. I. POKROVSKY***DEVELOPMENT OF PLASTIC METAL FORMING TECHNOLOGIES WITH USE
OF INTERMEDIATE MEDIA (IMPACT HYDROFORMING AND HYDRODYNAMIC EXTRUSION)***Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: arturu@tut.by*

Development of metal forming technologies with the use of fluid or pseudo-fluid media in application to difficult-to-deform and low-plastic materials is described. Two technological directions are considered: (i) hot hydrodynamic extrusion of cast iron articles using electrode graphite as a pseudo-fluid medium, and (ii) cold impact hydroforming of sheet materials using a liquid (a machining emulsion) and pseudo-fluid (polyurethane) medium. The most important achievements of the Physical Technical Institute in both of these directions and their advantages are described.

Keywords: impact hydroforming, cast iron, hydrodynamic extrusion, niobium.

Введение. Несмотря на то, что основные технологические приемы обработки металлов давлением известны очень давно, тем не менее проблемы получения качественных изделий из труднодеформируемых материалов остаются актуальными и в настоящее время.

Существуют различные подходы к улучшению обработки давлением труднодеформируемых материалов: материаловедческий (совершенствование структуры за счет оптимизации технологической плавки и повышение пластичности предварительной термообработки) и технологический (оптимизация схем деформации, температурных, силовых и скоростных параметров, создание новых технологических процессов). В Физико-техническом институте НАН Беларуси, удалось эффективно объединить данные подходы, создав собственную школу пластической обработки металлов.

Определяющее влияние схемы напряженного состояния на способность к пластическому формообразованию хрупких в обычных условиях сред. Общепринятым определением пластической деформации является необратимое изменение формы изделий при различных тер-

момеханических воздействиях, причем без разрушений в виде разных макро- и микроскопических повреждений [1].

Как известно, пластическая деформация представляет собой сложный процесс. При этом на величину предельной деформации (которую можно достичь без разрушения) влияют многие факторы (в частности, структура, механические характеристики металла, температурно-скоростные условия деформирования и др.). Наибольшее влияние на значение предельной деформации оказывают схемы напряженного состояния, существенно отличающиеся при различных процессах обработки давлением.

Первые попытки установить связь между пластичностью и напряженным состоянием относятся к концу 19 в. В 1911г. теоретически рассчитано и экспериментально подтверждено (Т. Карман, Р. Беккер), что в условиях неравномерного всестороннего сжатия даже хрупкие материалы могут пластически деформироваться. В частности, проводили эксперименты на сжатие с каррарским мрамором и песчаником, которые при испытаниях в обычных условиях разрушались, не успев проявить пластических свойств из-за низкого сопротивления деформации. Если образцы из мрамора испытывали в условиях неравномерного всестороннего сжатия, например в жидкости (глицерин), находящейся под высоким давлением (более 80 МПа), они обнаруживали пластические свойства (до 9%).

Первые эксперименты по ковке такого хрупкого в обычных условиях материала, как чугун, предприняты еще в 30-х годах 20 в. [2]. Для предотвращения трещин использовали промежуточную среду (оболочку), или, как тогда говорили, «рубашку» из мягкой стали, имитирующую гидростатическое сжатие.

Профессор Гарвардского университета (США) П. В. Бриджмен, проводя исследования пластичности хрупких веществ, показал, что наибольшая предельная деформация достигается при отсутствии растягивающих и увеличении сжимающих напряжений [3, 4]. Результаты исследования пластичности хрупких веществ и послужили одним из оснований для присуждения ученому Нобелевской премии по физике за 1946 г.

Полученные закономерности оказались применимы не только к металлам. В частности, в науках о горных породах (петрография и минералогия) известно, что породы, хрупкие в обычных условиях, находясь в условиях сдавливания в недрах Земли под огромным давлением, медленно пластически деформируются. Позднее доказано, что в специальных условиях пластическое течение может быть характерным для таких хрупких материалов, как легированные стали, бетоны, полимеры [5].

Исследования в Физико-техническом институте в области обработки давлением труднообрабатываемых материалов. Исследования в области пластической деформации труднообрабатываемых материалов начались в 40-е годы 20 в., когда институт возглавил академик АН БССР С. И. Губкин. Он сформулировал базовые положения в области пластической деформации, расширил представления о напряженном и деформированном состоянии тел при конечных пластических деформациях, внес огромный вклад в математическую теорию пластичности. Согласно теории С. И. Губкина, для обеспечения пластичности в хрупких телах необходимо наличие трехосного сжатия во всем объеме заготовки, причем, чем резче будет выражена схема всестороннего сжатия, тем в большей мере проявится пластичность материала. Кроме того, должны быть обеспечены условия, возможно, более равномерного протекания деформации [6, 7].

Дальнейшее развитие теория пластичности и ее основные аспекты (деформируемость, сопротивление деформированию, термомеханические режимы процессов горячего, полугорячего и холодного деформирования) получила в работах академика В. П. Северденко [8].

Следующий шаг в развитии в ФТИ технологий гидростатического выдавливания труднодеформируемых материалов – эксперименты по обработке давлением при повышенных температурах, использованию изотермических условий прессования и максимальных скоростей деформирования на серийном штамповочном оборудовании.

Создание и развитие в Физико-техническом институте технологий горячего гидродинамического выдавливания через промежуточную среду. В 60-х годах 20 в. В. П. Северденко, В. С. Мурасом, В. Г. Кантиным, Э. Ш. Суходревым разработаны принципиально новые схемы

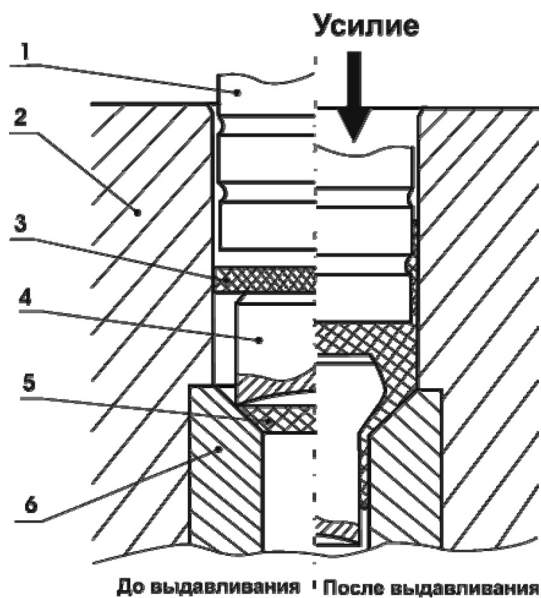


Рис. 1. Принципиальная схема процесса горячего гидродинамического выдавливания (слева от осевой линии — заготовка до выдавливания, справа — пруток после выдавливания): 1 — пуансон; 2 — контейнер штампа; 3 — вкладыш из электродного графита; 4 — заготовка, подвергаемая выдавливанию; 5 — пресс-остаток из электродного графита от предыдущей операции выдавливания; 6 — штамповая матрица с цилиндрическим отверстием и конусной заходной частью

слоя вдоль конуса и стенок прессовой матрицы («промежуточной матрицы»). Как выглядит такой своеобразный «чулок» показано в правой нижней части схемы на рис.1. Помимо главной своей функции (образование промежуточной среды) графит выполнял и роль смазки.

Начиная с 70-х годов данная технология нашла широкое применение при изготовлении режущего инструмента (сверла, фрезы, метчики, зенкеры, в том числе из быстрорежущей стали и из биметалла, включая композицию быстрорежущая сталь — сталь 40Х), а также деталей машин (шестерни с зубьями, втулки, вкладыши). В практической реализации технологии ГГДВ принимали участие большое число сотрудников института: В. М. Анищик, А. И. Заприварин, В. М. Стрикелев, В. И. Кошиль, Г. В. Кузнецов, И. К. Данильчик, А. Н. Чмеренко, Е. А. Кедо, П. И. Чуй, В. П. Новиков, С. З. Элимелах и др. Технологию внедрили на многих предприятиях, в частности на Куйбышевском моторостроительном заводе, заводе «Арсенал» (г. Киев).

В 70-х годах 20 в. в ФТИ Ю. Т. Антонишиным [10] начаты работы по получению с помощью ГГДВ изделий из чугуна (прутки, заготовки толкателей клапанов). В дальнейшем их продолжили В. А. Тиманюк, Л. Н. Тюрин и И. К. Данильчик С 90-х годов 20 в. пластической обработкой труднодеформированного чугуна занимается А. И. Покровский, делая упор на материаловедческие исследования особенностей структурообразования и получение градиентных структур по сечению изделий [11, 12].

Ниже приведены наиболее яркие примеры получения изделий из чугуна с большой степенью вытяжки.

1. *Выдавливание прутка шестигранного профиля из чугуна.* Из цилиндрической заготовки диаметром 28 мм выдавливали пруток в виде шестигранника под ключ 22, который использовали в качестве полуфабриката детали «цилиндр нагнетательного плунжера» домкрата грузового автомобиля Минского автомобильного завода (исследования выполнялись совместно с В. А. Тиманюком Л. Н. Тюриным) (рис. 2).

прямого выдавливания с использованием промежуточной среды, получившие название «горячее гидродинамическое выдавливание» (ГГДВ) [9]. В качестве промежуточной квазижидкой среды применяли вкладыш в виде таблетки из электродного графита. Принципиальная схема данного процесса приведена на рис. 1.

Процесс ГГДВ протекал следующим образом. Нагретую заготовку 4 устанавливали в подогретый контейнер штампа 2, сверху размещали вкладыш из электродного графита 3. При этом в матрице уже находился пресс-остаток 5 из электродного графита от предыдущей операции выдавливания. При движении пуансона 1 вниз со скоростью около 0,8 м/с графитовый вкладыш разрушался, превращаясь в порошок, который заполнял зазор между заготовкой и контейнером, а дальнейшее выдавливание заготовки происходило в псевдожидкой графитовой оболочке.

Следует особо отметить, что основная цель разработчиков была в избегании прямого контакта и достижении максимальной изоляции деформируемой заготовки со стенками контейнера и поверхностью матрицы во время ее истечения. Главным фактором, определяющим высокую эффективность течения заготовки из труднодеформируемых материалов, — образование промежуточного псевдожидкого

Степень деформации составляла 35%. В качестве материала использовали серый и высокопрочный чугуны, их отличительной особенностью оказался достаточно узкий температурный интервал деформации, составляющий для высокопрочного чугуна 900–1000 °С, а для серого чугуна 920–975 °С. Серый чугун показал особую чувствительность к перегреву; так, нагрев всего на 20–30 °С выше оптимальной температуры приводил к оплавлению границ зерен и появлению трещин. В случае строгого соблюдения температурного режима при выдавливании оба материала были достаточно пластичными и не нуждались в предварительной термической обработке. На Барановичском автоагрегатном заводе из полученных горячим выдавливанием чугунных шестигранников по действующей технологии изготавливали деталь «цилиндр нагнетательного плунжера». При этом качество поверхности граней не требовало дополнительной механической обработки.

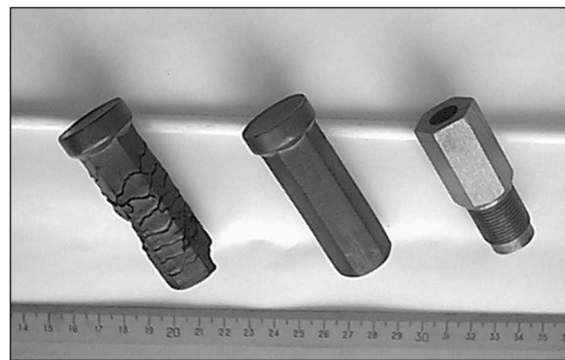


Рис. 2. Заготовка в виде шестигранного прутка, полученная горячим гидродинамическим выдавливанием из высокопрочного чугуна; слева направо: с нарушением технологии, при оптимальной температуре, готовая деталь «цилиндр нагнетательного плунжера»

2. *Выдавливание из чугуна втулок с отверстием малого диаметра.* Горячим выдавливанием чугуна (работа выполнялась совместно с В. А. Тиманюком) получали заготовку детали «направляющая втулка клапана» двигателя Д-240 Минского моторного завода (рис. 3). Существующая технология предусматривала отливку цилиндрической заготовки без отверстия в разовые песчано-глинистые формы и последующую механическую обработку. Материалом служил серый перлитный чугун, для повышения износостойкости легированный сурьмой (0,04–0,12%). Интерес к получению полой втулки методами обработки давлением вызван тем, что из-за пригара стержней при литье невозможно получить отверстие диаметром 10 мм, а сверление износостойкого материала на глубину 85 мм существенно увеличивало расход инструмента.

Для формообразования отверстия применяли пуансон с иглой (рис. 3), диаметр которой соответствовал отверстию втулки. Использовали кривошипно-шатунный пресс марки К-2130 усилием 100 т. Степень деформации составляла 70%. Установлено, что у серого чугуна при деформировании методом прямого выдавливания оказался недостаточный запас пластичности и на поверхности возникали трещины. Прямым выдавливанием удалось получить втулки только из высокопрочного чугуна. Для деформирования серого чугуна дополнительно использовали противодействие величиной 20 МПа, что позволило получить качественные втулки. Преимуществами изготовления данной детали горячим выдавливанием являются существенное повышение коэффициента использования металла (от 0,51 до 0,75) за счет снижения припусков, объема механической обработки, расхода сверл (уменьшается в три раза). Кроме того, на 26% снижается объем выплавляемого чугуна, так как за счет уменьшения высоты заготовок их количество в отливаемом прутке увеличивается в три раза при неизменном объеме прибыльной части.

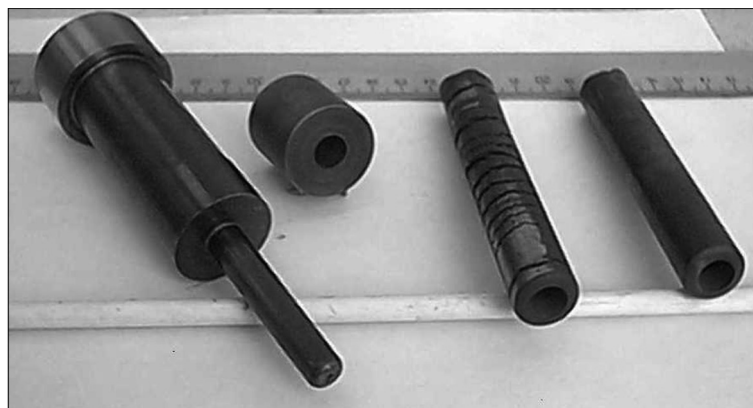


Рис. 3. Инструмент и полуфабрикаты детали «направляющая втулка клапана»; слева направо: пуансон с иглой, исходная заготовка, втулка с трещинами, полученная без противодействия, качественная втулка, полученная с использованием противодействия



Рис. 4. Изображения детали «корпус сверлильного патрона» из ковкого чугуна, полученной методом обратного выдавливания из цельной цилиндрической заготовки за один проход

3. *Получение деталей из чугуна типа «стакан» обратным выдавливанием.* Одним из наиболее ярких примеров раскрытия потенциала пластичности чугуна в условиях ГГДВ является успешное получение детали «корпус сверлильного патрона» методом обратного выдавливания за один проход (работа выполнялась совместно с И. К. Данильчиком) (рис. 4).

Опробование выдавливания ковкого чугуна показало его высокую технологическую пластичность. Следует отметить, что штамповка осуществлялась всего за один удар, а степень деформации в зоне стенок детали достигала 85%, при этом никакого нарушения целостности металла не наблюдалось.

Создание и развитие в Физико-техническом институте технологий гидроударной листовой штамповки через промежуточную среду. Исследования по гидроударной листовой штамповке с использованием промежуточной среды в ФТИ начали еще в 1966 г. В это время в машиностроительной отрасли Беларуси активное развитие получила импульсная обработка материалов. Она подразумевала кратковременное (порядка микросекунд) высокоскоростное воздействие различной природы (ударное, магнитное, электрическое) на материалы с целью их формообразования [13, 14].

Для научного обеспечения этого направления в ФТИ создана лаборатория физико-химической механики, а ее руководителем назначен канд. техн. наук В. Н. Чачин (1930–1994) (впоследствии директор ФТИ, лауреат государственной премии, академик, ректор БПИ). Первыми сотрудниками были А. Л. Скрипниченко, Г. К. Семяко, Е. Я. Головкина, Б. И. Горбачев, В. В. Куницкий, А. Г. Яскович и др.

Научные задачи лаборатории – исследование характера взаимодействия импульсных ударных нагрузок с преградами, определение оптимальных энергосиловых характеристик и разработка технологических схем обработки. В лабораторию входили три тематические подразделения:

группа магнитно-импульсной обработки (руководитель А. Л. Скрипниченко),

группа электрогидроимпульсного деформирования (руководитель В. Л. Шадуя),

группа гидроударной обработки (руководитель Г. К. Семяко).

Группой гидроударной обработки (Г. К. Семяко, В. С. Петраковский, Т. М. Наумович, В. А. Францкевич и др.) в 70-е годы разработан принципиально новый метод ударной листовой штамповки, схема которой представлена на рис. 5.

Штамповка производилась импульсом высокого давления, создаваемого в результате удара быстродвижущегося бойка по замкнутому объему жидкой (станочная эмульсия) или эластичной среды (полиуретан), заполняющей рабочую камеру пресса. Источником энергии являлся сжатый воздух цеховой пневмосистемы. Особенности процесса – кратковременность приложения нагрузки (300–600 мкс) и отсутствие пуансона, роль которого выполняла передающая среда.

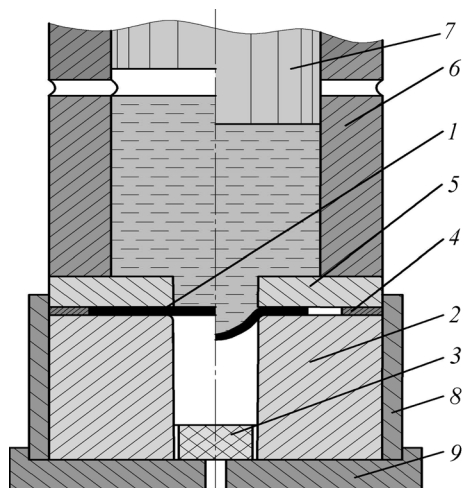


Рис. 5. Схема гидроударной штамповки через промежуточную среду (на примере получения детали типа полусферы). Слева от осевой линии – плоская листовая заготовка, справа – отштампованное готовое изделие: 1 – заготовка, 2 – матрица, 3 – амортизатор, 4 – центрирующая шайба, 5 – прижим, 6 – рабочая камера, 7 – боек, 8 – обойма, 9 – зажимная плита



а



б

Рис. 6. Разработанные в ФТИ прессы для гидроударной штамповки с использованием промежуточной среды: *а* – модель СФТ-514 для штамповки через полиуретан, *б* – модель СФТ-510 для штамповки через эмульсию

В вышедшем в 1978 г. библиографическом указателе трудов [15], выполненных в ФТИ по этой тематике, насчитывается около 300 публикаций.

В практическом плане разработаны быстропереналаживаемые технологии листовой штамповки для получения широкого круга изделий из листового металла толщиной до 3 мм. Обработке успешно подвергались алюминий, медь и их сплавы, латунь, углеродистая, легированная, нержавеющая, жаропрочная стали, титан, благородные металлы. Достоинства технологии – возможность быстрой переналадки, недорогая оснастка (до 3 раз дешевле обычной), высокая эффективность при обработке труднодеформируемых материалов.

1976 г. ознаменовал принципиально новый этап деятельности лаборатории – научные и технологические наработки начали реализовываться при изготовлении собственного оригинального оборудования. Его проектировали совместно с сотрудниками отдела импульсной обработки материалов СКТБ ФТИ (В. К. Колос, В. В. Ботян, В. А. Кашперко, И. А. Антоненков). Разработанные в ФТИ гидроударные прессы показаны на рис. 6.

Разработана линейка гидроударных прессов с максимальной энергией удара до 25 кДж, имеющих компактные габариты (всего $2,6 \times 2,0$ м в плане и высотой 3,6 м) и удобную для транспортировки относительно небольшую массу (до 9 т). Первые образцы прессов изготовлены непосредственно на опытном производстве ФТИ.

В качестве рабочей жидкости использовали обычную технологическую эмульсию (СОЖ). Важно, что энергоносителем являлся сжатый воздух цеховой пневмосистемы давлением до 0,63 МПа, что было проще и безопаснее штамповки электроразрядом или взрывчатыми веществами. Оборудование было мобильным; такой пресс можно было быстро перевезти на новую площадку, смонтировать в течение суток и при наличии компрессора начать работу практически в любых условиях.

Прессы позволяли производить практически все операции холодной листовой штамповки: вытяжку из плоской и пространственной заготовки, раздачу труб и полых заготовок, обжим, формовку, пробивку-вырубку плоских и пространственных деталей, калибровку, отбортовку. Стоит отметить, что многие операции могли быть выполнены совместно за один цикл работы.

За более чем 40-летнюю историю существования лаборатории освоено более сотни различных типоразмеров деталей. Значительная их часть представляла собой чрезвычайно ответственные комплектующие детали для авиационной и военной техники: корпуса «черных ящиков» самолетов, детали обогрева крыла, детали аэродромного оборудования, корпуса гироскопов под-

водных лодок. Выполнялись и эксклюзивные заказы, в частности, значительная часть дверной фурнитуры для здания парламента Венгрии изготовлена по данной технологии. Заказчики лаборатории – Ташкентский авиационный завод, Харьковский авиационный институт, Куйбышевский моторный завод, Красноярский приборостроительный завод, Минский тракторный завод, завод им. Вавилова (Минск) и др. Некоторые образцы получаемых деталей приведены на рис. 7.

В начале 80-х годов 20 в. разработанными в ФТИ технологиями гидроудара заинтересовалось Министерство авиационной промышленности СССР. Страна стремилась стать лидером в области самолетостроения и при этом решающую роль играли сроки подготовки производства. Требовалось быстрое освоение новых моделей, а технология гидроудара обеспечивала существенный эффект за счет экономии на проектировании и изготовлении штампов, значительного сокращения сроков подготовки производства. Специальная межведомственная комиссия провела приемку прессов, и после успешных испытаний на Ташкентском авиационно-производственном объединении им. Чкалова было принято решение организовать их серийный выпуск.

В течение 1985–1992 гг. при научном сопровождении лаборатории завод «Кузлитмаш» (г. Пинск) изготовил свыше 150 ед. гидроударных прессов различных модификаций, которые были поставлены на ведущие предприятия СССР (авиационно-космического, военно-промышленного и общемашиностроительного профиля). Период 80–90-х годов 20 в. – пик достижений лаборатории высоких давлений. Научный уровень исследований подтвержден защитой докторских и кандидатских диссертаций и присуждением в 1980 г. Государственной премии БССР в области науки и техники за разработку технологических процессов и специального оборудования для импульсной обработки материалов и внедрение их в машиностроении (В. Н. Чачин, А. Л. Скрипниченко, Г. Н. Здор, А. Ю. Журавский). Выполнен ряд контрактов с зарубежными фирмами, например, Zak & Kiselbah, (Швеция), Венгерский монетный двор. Число полученных патентов достигло 100, проданы лицензии в Италию, Швецию, Венгрию.

Следствие таких успехов – выделение в 1987 г. сектора гидроударной обработки в отдельную лабораторию высоких давлений. После назначения В. Н. Чачина ректором Белорусского политехнического института на некоторое время лаборатория перебазировалась БПИ, а В. Н. Чачин

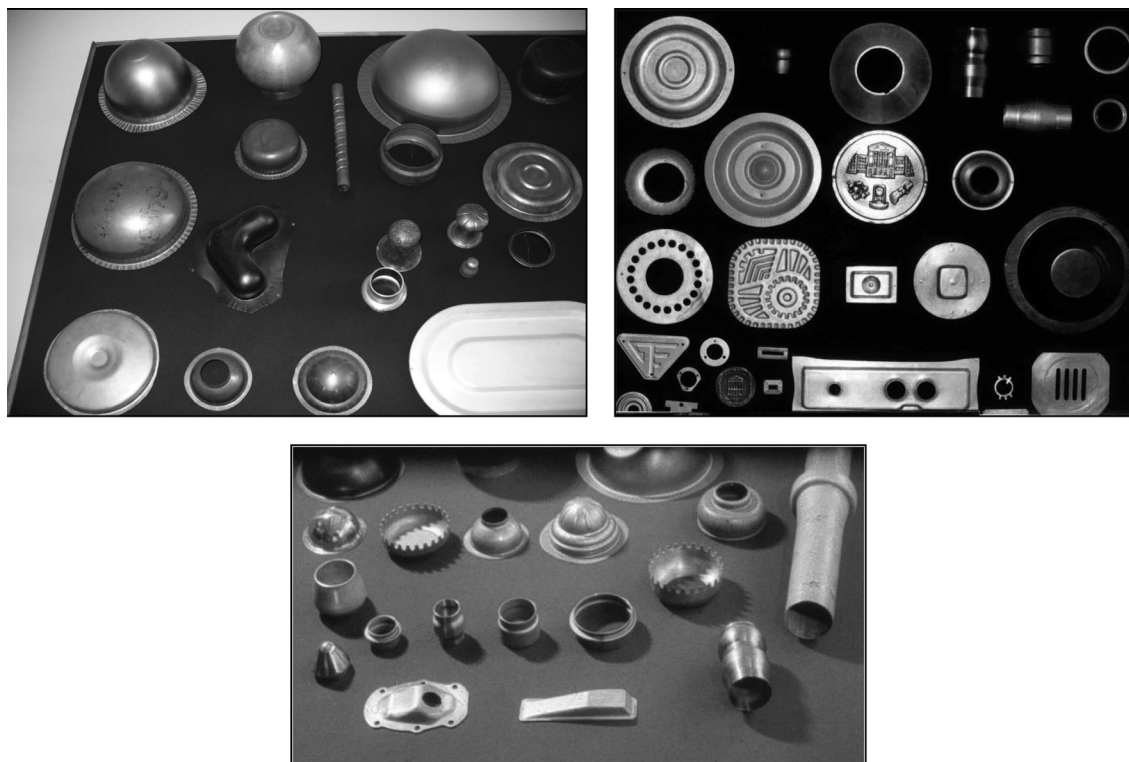


Рис. 7. Изделия, получаемые в ФТИ гидроударной штамповкой

продолжал лично руководить ею на общественных началах. В лаборатории созданы две отдельные тематические группы, занимающиеся разработкой технологических процессов ударной штамповки жидкостью (руководитель – канд. техн. наук В. С. Петраковский) и эластичной средой (руководитель – канд. техн. наук А. Ю. Журавский).

Позднее лаборатория возвратилась на площади ФТИ, где ее руководителем с 1989 г. назначен Г. Н. Здор, который в 1999 г. защитил докторскую диссертацию по разработке типовых технологий импульсного деформирования материалов [16].

В 2001 г. лаборатория включена в состав отдела быстропротекающих процессов и разрушений (заведующий – докт. техн. наук Г. Н. Здор) В 2003 г. Г. Н. Здор назначен директором Института сварки, но выполнял обязанности заведующего отделом на общественных началах. Оперативное руководство лабораторией осуществлял его заместитель А. Ю. Журавский.

С июля 2011 г. заведующим лабораторией является канд. техн. наук А. И. Покровский. В настоящее время работы в лаборатории проводятся по трем основным направлениям: 1) исследование влияния импульсных силовых воздействий высокой интенсивности на поведение твердых тел и разработка технологий формообразования тонколистовых материалов; 2) исследование процессов горячей пластической деформации и структурообразования труднодеформируемых гетерогенных материалов типа чугунов и их практическая реализация; 3) развитие теоретических и технологических аспектов создания композиционных материалов на металлической и неметаллической основах.

Для практического использования главными преимуществами технологии гидроударной штамповки являются быстрая переналадка и освоение новых моделей малыми сериями. Они обеспечивали безусловный успех тематики в советское время, когда требовалось освоение производства малых серий новых образцов авиационной и военной техники в короткие сроки.

В настоящее время приходится переориентироваться на продукцию общемашиностроительного назначения и искать свою «нишу» часто за пределами Беларуси, выполнять эксклюзивные заказы, которые не по силам классической штамповке. В частности, в последние годы проводятся работы, связанные с получением сложнопрофильных деталей из высоко- и особоочистых металлов, в том числе благородных (серебро, платина).

В рамках направления по металлургическому переделу лома драгоценных металлов, основанного в ФТИ докт. техн. наук Г. В. Купченко, разработки в области гидроударной штамповки нашли практическое применение при изготовлении следующих изделий: фильерных пластин из серебра для ОАО «Могилевхимволокно»; платиновой лабораторной посуды (тигли, чашки и др.) для заводских лабораторий химической промышленности (Гомельский химический завод), строительной индустрии (Белорусский цементный завод, Кричевцементошифер, Красносельскстройматериалы); распылительной Y-образной мишени из платины для ОАО «Интеграл». В настоящее время лаборатория высоких давлений совместно с другими подразделениями ФТИ полностью удовлетворяет потребности Республики Беларусь в платиновых тиглях. Образцы штампованных тиглей из чистой платины показаны на рис. 8.

Начиная с 2011 г. освоена широкая гамма изделий лабораторного назначения (более 30 типоразмеров) для многих предприятий Беларуси и России, таких как Любанский сыродельный завод, холдинг «Белорусские обои», Восточно-Сибирский университет, «Смоленскпромприбор», «Росучприбор», «Геосервис», «Медбиотех», «Салитрэйдинг», «Магия света», «БелАвалон» «Консонанс», «Та-



Рис. 8. Образцы тиглей из платины (применяются в цементной промышленности, нефтехимии, производстве стекловолокна), изготовленные в лаборатории высоких давлений ФТИ с использованием гидроударной штамповки



Рис. 9. Лабораторные стаканчики для строительных, химических, геофизических лабораторий, изготовленные в лаборатории высоких давлений ФТИ с использованием гидроударной штамповки

лан», «Гранат» и др. Некоторые изделия лабораторного назначения, изготовленные из алюминиевого листа, представлены на рис. 9.

Из последних достижений можно отметить изготовление в 2013 г. комплекта деталей для крепления видеокамеры к корпусу беспилотного летательного аппарата «Бусел-М» производства НПЦ «БАК и технологии» ФТИ. Корпус беспилотного летательного аппарата выполнен из стеклопластика и при креплении непосредственно к нему камеры, последняя не всегда выдерживала нагрузки, особенно при жесткой посадке аппарата. Был необходим набор переходных элементов как для фиксации видеокамеры к днищу аппарата, так и для ее вращения при съемке во время полета. Проблема заключалась в том, что требовались абсолютно идентичные детали малым тиражом.

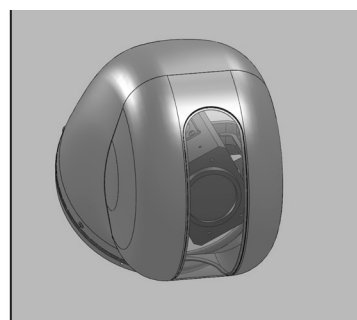
Эта задача была успешно решена ведущим научным сотрудником лаборатории В. С. Петраковским. На рис. 10 представлен внешний вид беспилотного летательного аппарата, видеокамеры и изготовленных деталей.

Наиболее весомым достижением лаборатории в последние годы является успешное изготовление опытных образцов сверхпроводящего ниобиевого резонатора (рис. 11, *а*) для ускорителя электронов и позитронов (рис. 11, *б*).

В 2012 г. начались работы совместно с Объединенным институтом ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна, Россия) в рамках международного проекта ILC (International Linear Collider) по



а



б



в

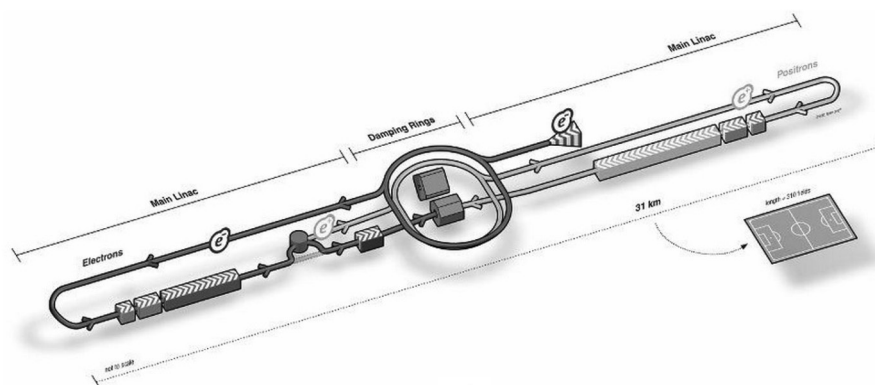


г

Рис. 10. Внешний вид беспилотного летательного аппарата производства ФТИ (*а*), видеокамеры (*б*) и комплекта деталей для крепления видеокамеры к днищу беспилотного летательного аппарата, полученных в лаборатории высоких давлений ФТИ гидроударной штамповкой (*в*, *г*)



а



б

Рис. 11. Один из ключевых элементов международного линейного коллайдера – резонатор из особо чистого ниобия (исполнение в виде 9-ячеечной секции) (а), схема международного линейного коллайдера (б) (для наглядного понимания масштаба сооружения справа рядом изображено футбольное поле). Для функционирования ускорителя необходимо изготовить несколько десятков тысяч таких секций

строительству международного линейного коллайдера в Японии. Координатором от Беларуси комплексного проекта (в котором участвовали Физико-технический институт, БГУ, БГУИР, НПЦ НАН Беларуси по материаловедению) являлся заместитель директора Национального научно-учебного центра физики частиц и высоких энергий БГУ канд. физ.-мат. наук М. А. Батурицкий

В этом проекте наиболее ярко проявились все преимущества и наработки технологии гидроударной штамповки: высокая равномерность прилагаемой нагрузки, уменьшающая внутренние напряжения в детали, отсутствие контакта пуансона с заготовкой (и соответственно дефектов на поверхности резонатора в виде рисок и царапин), быстрота освоения нового изделия. Важным преимуществом являлось отсутствие массопереноса со штамповой оснастки, так как обрабатывался особо чистый ниобий (99,999%), загрязнение которого недопустимо.

Задача сотрудников лаборатории высоких давлений в данном проекте состояла в непосредственном изготовлении экспериментальных образцов резонатора из исходных листовых заготовок. Важно было придать заданную чертежом сложную форму составным частям резонатора – полукамерам с изменяемым по профилю радиусом (рис. 12). Именно соблюдение идентичности параметров внутренней поверхности резонатора и обеспечивает последующий «разгон» – эффективное и однородное ускорение всего пучка электронов переменным электромагнитным полем. До настоящего времени во всем мире эти изделия выпускались всего лишь двумя зарубежными хорошо зарекомендовавшими себя фирмами.



Рис. 12. Внешний вид деталей типа «полукамера», являющихся составными частями резонатора ускорителя электронов, изготовленных из особо чистого ниобия в лаборатории высоких давлений ФТИ гидроударной штамповкой

Лабораторией высоких давлений успешно изготовлены требуемые элементы резонатора, причем с высочайшей точностью [17]. Отклонения от номинального размера не превысили 0,05–0,1 мм, а значительная часть изделий отштампована без какого-либо отклонения от номинала. Коэффициент выхода годных изделий при штамповке составил 100% (брак полностью отсутствовал), что было очень важно, так как ниобий по стоимости дороже серебра.

В лаборатории высоких давлений решена также проблема чрезвычайно трудной механической обрабатываемости штампованной заготовки из особо чистого ниобия [18]. Она связана с высокой вязкостью этого материала и налипанием на инструмент в процессах подрезки торцев и проточки стыков под последующий сварной шов. По результатам работ накоплен бесценный опыт и ряд «ноу-хау», а ключевые технологические операции запатентованы [19, 20].

С использованием новой комбинированной технологии, сочетающей в себе беспуансонную штамповку и электронно-лучевую сварку, совместно с сотрудниками лаборатории электрофизики ФТИ изготовлены и в декабре 2014 г. испытаны в НИИ ЯП БГУ образцы первого в Беларуси сверхпроводящего высокочастотного резонатора из ниобия. Совокупность измеренных электрических параметров резонатора на частоте 1,3 ГГц, в частности, показателя добротности $1,49 \times 10^9$ и устойчивой работы в сверхпроводящем режиме свидетельствовала о полном соответствии формы, размеров и основных его характеристик прототипам, изготавливаемым мировыми лидерами (FermiLab, США и DESY, Германия). На рис. 13 представлен финишный результат испытаний.

Такие уникальные изделия получены в Беларуси впервые, ранее выпускались только «теплые» резонаторы с добротностью менее 10^6 . Успешные результаты проекта отмечены средствами массовой информации и вызвали интерес Министерства промышленности Республики Беларусь.

Разработанная технология имеет перспективы для широкого спектра применений – в альтернативной энергетике, промышленности, в технике для научных исследований и др. В 2016 г. предполагается продолжить подобную работу для Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ, г. Дубна, Россия), который планирует реконструкцию собственного ускорителя.

Что касается дальнейшего развития технологии гидроударной штамповки в Беларуси, то на ближайшие годы поставлена задача сохранения имеющихся потребителей и приобретения новых. Это предприятия следующих ведомств: Министерства архитектуры и строительства (ОАО «Красносельскстройматериалы», ПРУП «Кричевцементошифер», ПРУП «Белорусский цементный завод», г. Костюковичи), Министерства промышленности (ПО «Минский тракторный завод», ОАО «Белорусский металлургический завод»),



Рис. 13. Белорусско-российские участники проекта после успешного завершения испытаний изготовленного в ФТИ ниобиевого резонатора (г. Минск, НИИ ЯП БГУ, декабрь 2014 г.). Слева направо: В. Н. Родионова (НИИ ЯП БГУ), М. А. Батурицкий – координатор проекта от Беларуси (НЦФЧВЭ БГУ), Н. Азарян – координатор проекта от РФ (ОИЯИ, г. Дубна), А. А. Марышева (ФТИ НАН Беларуси).

Белорусского государственного концерна по нефти и химии (ОАО «Гомельский химический завод»), Министерства сельского хозяйства и продовольствия (ОАО «Любанский сыродельный завод» концерна «Минмясомолпром»), концерна «Белбумпром» (ОАО «Управляющая компания холдинга «Белорусские обои», г. Добруш), а также большое число коммерческих фирм. Тематика работ будет касаться изготовления широкого спектра деталей типа чашек, крышек, стаканчиков, фланцев для химического и лабораторного оборудования, работающего в нейтральных и агрессивных средах.

В долгосрочной перспективе целью лаборатории высоких давлений будет разработка научных и технологических основ получения малых партий изделий из редких сплавов (платина, ниобий, серебро). Мы надеемся, что среди извест-

ных методов пластической деформации научные и технологические наработки лаборатории в данной области будут по-прежнему востребованы и конкурентоспособны.

Заключение. Идеи гидропрессования, заложенные Т. Карманом и П. Бриджменом, развитые и дополненные С. И. Губкиным, В. П. Северденко, В. Н. Чачиным, Г. Н. Здравом, их учениками и последователями, в Физико-техническом институте НАН Беларуси удалось успешно трансформировать в конкретные технологические процессы и оборудование, эффективно используемые в реальном секторе экономики.

Основными преимуществами процесса гидропрессования по сравнению с обычным прессованием являются: наиболее полное раскрытие потенциала пластичности пластических характеристик хрупких, малопластичных и труднодеформируемых материалов, расширение технологических особенностей процесса, улучшение структуры и свойств получаемых изделий.

В случае обработки таких хрупких материалов, как чугуны, метод горячего гидродинамического выдавливания через графитную среду является исключительно эффективным, позволяющим без разрушения достигать степеней деформации до 90%, получать качественные изделия с высокой степенью точности и улучшенными характеристиками.

Очевидной технологической «нишей» холодной гидроударной листовой штамповки является мелкосерийное производство, где эффект достигается за счет высокой равномерности прилагаемой нагрузки, низкой металлоемкости штамповой оснастки, быстрого освоения новых моделей.

При работе с особо чистыми материалами (золото, серебро, платина, ниобий) преимуществами гидроударной штамповки являются отсутствие массопереноса на заготовку материала инструмента и загрязнений.

Таким образом, лаборатория высоких давлений Физико-технического института НАН Беларуси успешно реализует на предприятиях реального сектора экономики разработанные и проверенные на практике быстропереналаживаемые технологии листовой штамповки широкого круга изделий из алюминия, углеродистой, нержавеющей, жаропрочной стали, титана, латуни, меди, серебра, платины, ниобия толщинами от 0,5 до 3 мм.

Список использованной литературы

1. Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach / Callister, William D., Rethwisch, David G. 2012 – Technology & Engineering – 910 pages.
2. Баранов, С. А. Ковка чугуна / С. А. Баранов // Сообщения всесоюз. института металлов. – М.; Л.: Государственное научно-техническое издательство. – 1931. – № 8. – С. 22–25.
3. Бриджмен, П. В. Новейшие работы в области высоких давлений / П. В. Бриджмен // Успехи физических наук. – 1947. – Т. 31, № 3. – С. 346–402.
4. Bridgman, P. W. The physics of high pressure / P. W. Bridgman. – Dover Publications, 1931. – 398 pages; русский перевод книги: Исследование больших пластических деформаций и разрыва. – М.: Изд-во иностр. лит-ры., 1955. – 444 с.
5. Потапова, Л. Б. Механика материалов при сложном напряженном состоянии / Л. Б. Потапова. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 244 с.
6. Губкин, С. И. Теория течения металлического вещества / С. И. Губкин. – М.; Л.: ОНТИ, 1935.
7. Губкин, С. И. Пластическая деформация материалов / С. И. Губкин. – М.: Metallurgizdat, 1960–1961. – Т. 1–3.
8. Северденко, В. П. Теория обработки металлов давлением / В. П. Северденко. – Минск: Высшая школа, 1966. – 224 с.
9. Северденко, В. П. Горячее гидродинамическое выдавливание режущего инструмента / В. П. Северденко, В. С. Мурас, Э. Ш. Суходрев. – Минск: Наука и техника, 1974. – 254 с.
10. Антонишин, Ю. Т. Пластическая деформация чугуна / Ю. Т. Антонишин. – Минск: Наука и техника. 1991. – 119 с.
11. Покровский, А. И. Влияние формы графитовых включений на акустические характеристики изделий из литого и деформированного чугуна / А. И. Покровский, А. С. Чаус, Э. Б. Куновский // Металловедение и термическая обработка металлов. – М.: «Изд. дом «Фолиум», 2011. – № 7 (673), июль. – С. 3–10.
12. Чаус, А. С. Влияние горячей пластической деформации на изменения микроструктуры чугуна с шаровидным графитом / А. С. Чаус, Я. Сойка, А. И. Покровский // Физика металлов и металловедение. – М.: Наука, 2013. – Т. 114, № 1. – С. 94–104.
13. Импульсные методы обработки металлов: [сборник]; под ред. В. Н. Чачина. – Минск: Наука и техника, 1977. – 216 с.
14. Чачин, В. Н. Электрогидравлическая обработка машиностроительных материалов / В. Н. Чачин. – Минск: Наука и техника, 1978. – 184 с.

15. Библиографический указатель трудов, выполненных в ФТИ АН БССР по импульсным методам обработки материалов. – Минск: ФТИ АН БССР, 1978. – 31 с.
16. Здор, Г. Н. Технологии высокоскоростного деформирования материалов / Г. Н. Здор, Л. А. Исаевич, И. В. Качанов. – Минск: БНТУ, 2010. – 456 с.
17. Гидроударная штамповка полукамер резонатора из сверхчистого ниобия. Состояние и перспективы создания резонаторов для нового поколения линейных ускорителей и коллайдеров: Труды международного рабочего совещания (Минск, 22–25 апреля 2014 г.) / А. Ю. Журавский [и др.]. – Дубна: ОИЯИ, 2015. – С. 42–48.
18. Изменение свойств листового сверхчистого ниобия при гидроударной вытяжке / В. С. Петраковский [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: матер. 10-й МНТК 16–18 сент. 2015 г. в 3 кн. – Минск, 2015. – Кн. 3. – С. 93–96.
19. Устройство для ударной штамповки тонколистовых материалов на прессе: пат. Респ. Беларусь 19098 от 30.04.2015 / А. Ю. Журавский, В. С. Петраковский, Г. Н. Здор, М. А. Батурицкий, А. И. Покровский, Н. Ю. Гутько.
20. Способ ударной штамповки деталей из листового материала эластичной средой: пат. Респ. Беларусь 19099 от 30.04.2015 / А. Ю. Журавский, В. С. Петраковский, Г. Н. Здор, М. А. Батурицкий, А. И. Покровский, Н. Ю. Гутько.

Поступила в редакцию 28.01.2016